

胡振琪,龙精华,王新静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报,2014,39(8):1751-1757. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.9029

Hu Zhenqi, Long Jinghua, Wang Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1751-1757. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.9029

论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复

胡振琪,龙精华,王新静

(中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所,北京 100083)

摘 要:煤炭开采不可避免导致矿区生态环境的破坏,过去大多数研究和实践都是侧重人工修复,如何区分和合理选择及应用自修复、自然修复和人工修复,对经济合理地修复矿区环境具有重要意义。在阐述矿区生态修复概念的基础上,分别对人工修复、自然修复和自修复及其相互关系进行了讨论和分析,提出成本效益型矿区生态环境修复战略。研究表明:对矿区损毁的生态环境通过人工或自然的力量恢复的过程分别称之为人工和自然修复;生态系统的自修复、自我修复都是依靠自然界自身的力量,统称为自然修复。矿区生态环境的自修复是指采矿驱动力在对地表生态环境造成损毁的过程中,又自动修复部分生态损毁的现象和过程。基于开采沉陷学原理,揭示了煤矿区自修复的机理。矿区生态修复应该首先根据损毁的自然条件,分析是否存在自修复和自然修复的可能性并尽可能发挥自修复和自然修复的作用以节约修复成本;科学划分自修复、自然修复和人工修复的区域并采用相应的修复对策;对生态脆弱区尤其要重视自修复和自然修复,尽量减少人工修复,最终实现生态系统的自然演替和平衡。

关键词:生态环境;自修复;自然修复;人工修复;采煤沉陷

中图分类号:TD167 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2014)08-1751-07

Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining

HU Zhen-qi, LONG Jing-hua, WANG Xin-jing

(Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 10083, China)

Abstract: Coal mining inevitably leads to the ecological damage in mining areas. Most of the researches and practices placed an emphasis on artificial restoration in the past research activities. However, the differences among self-healing, natural restoration and artificial restoration should be distinguished, which could benefit the cost and effectiveness of reclamation. Based on introduction of the concept of ecological restoration for mining areas, the interrelations of self-healing, natural restoration and artificial restoration were discussed, and a cost-effective strategy for mining ecological restoration represented in this paper. The research shows that the progresses of the damaged natural environment repaired by artificial or natural power are called artificial restoration and natural restoration, respectively. The self-healing of ecosystem and natural restoration are both relying on the natural power, which are all identified as the natural restoration. The self-healing of mining ecological environment means that a part of damage is recovered automatically by mining driving force during the process of ecological damage, which is in the process of mining. Based on the theory of mining sub-

收稿日期:2014-05-26 责任编辑:王婉洁

基金项目:国家自然科学基金委员会-神华集团有限公司煤炭联合基金资助项目(U1361203)

作者简介:胡振琪(1963-),男,安徽五河人,教授,博士生导师。E-mail:huzq@cumtb.edu.cn

sidence, the mechanism of the self-healing was revealed. Therefore, ecological restoration caused by coal mining should follow some principles: firstly, the damage characteristics must be analyzed and the possibility of self-healing and natural restoration should be determined; secondly, the districts of self-healing, natural restoration and artificial restoration should be classified and corresponding restoration planes could be made; thirdly, self-healing and natural restoration should be paid much attention in fragile ecology region and artificial restoration should be reduced as much as possible, so the natural succession and ecosystem balance can be realized.

Key words: ecological environment; self-healing; natural restoration; artificial restoration; mining subsidence

煤炭是我国最主要、最可靠的能源,但煤炭开采在为国民经济的发展发挥巨大作用的同时,也不可避免地对矿区生态环境造成破坏,如露天挖损导致的土壤和植被破坏以及景观变化、井工开采导致大量土地沉陷和地表裂缝、水文地质条件破坏导致地下水位下降和水资源流失、煤矸石山不仅占压土地还污染环境,此外矿山开采还污染地表水和土壤,因此,煤矿区生态环境的修复就成为我国一项十分紧迫的任务^[1],直接关系到绿色矿山建设和生态文明建设的成败。

1999-01-01 生效的国务院《土地复垦规定》的颁布,标志着我国煤矿区土地复垦与生态修复走上了法制化的轨道。国土资源部耕地保护、地质环境治理 and 环境保护部等行政管理部门高度重视矿区生态环境修复工作,分别从土地复垦、地质环境、矿区环境等多个方面推动和监管矿区生态环境修复。国外早在 20 世纪初就开始对矿区(尤其是煤矿区)生态环境进行修复,在法规、监管机制、修复技术等方面都取得了许多经验和成功的案例^[1-6]。国外对矿区生态环境的修复常用 restoration, reclamation 和 rehabilitation 表示,目前国外已经将三者视为相同的含义^[2,7],只是各个国家的习惯不同,采用不同的名称,如美国常常用“reclamation”、加拿大和澳大利亚习惯用“rehabilitation”,英国则常常用“restoration”。我国的矿区生态环境修复名词和起源主要来自于国外,由于专业的角度不同以及政府管理职责不同,因而产生了多个翻译的中文专业名词,如“土地复垦”、“生态重建”、“生态修复”、“生态恢复”、“地质环境治理”、“矿区环境治理”、“综合治理”等等,对于矿山开采导致的生态环境问题的治理来说,这些不同名词的实质是一样的,比如:在一个平原矿区因采煤形成了一大片沉陷地,这既可以讲是“土地复垦”问题、也可以讲是“地质环境”问题、也可以讲是“矿区环境”问题,因此,在名词上去细究意义不大,对矿区应视为相同的研究问题。由于不同管理部门和不同专业侧重点不同导致的名词的不同也是合理的,可以从不同侧重点的角度对待矿区生态环境修复,但我们必须理解其相同的内

涵和实质,本文的研究正是基于这一理念,因此,本文研究的“生态修复”也适用于“矿区土地复垦”、“矿区地质环境”、“矿区环境治理”等。

在国内外矿区生态修复的实践中,由于矿山对生态环境破坏的严重性,大量的研究都是放在人工修复措施上,如我国形成的采煤沉陷地修复技术主要包括平整法、疏排法、挖深垫浅法、充填法等,但随着采煤向西部转移,西部生态脆弱区采煤沉陷土地和生态的损伤特点与原先研究的东部矿区完全不一样,上述沉陷修复技术已经无法适用,此外,生态脆弱区人工修复过程中可能导致对脆弱生态的进一步扰动问题也得到了关注,于是许多学者认为自然力的修复必须得到重视,对一些沉陷影响不大、具备自然修复能力的区域大量投资进行人工修复提出了质疑^[8-9]。国外也非常关注修复的投入产出问题,重视成本效益型(cost-effective)技术的研发^[10]。近年来在神华集团的支持下,在神东矿区进行了野外动态监测,发现了一些采煤沉陷损伤自修复的现象^[8,11-12],但自修复的概念是什么、自修复与自然修复及人工修复的关系是什么以及如何应用等问题还未得到深入的研究,而正确理解、区分和应用自修复、自然修复和人工修复对煤矿区生态修复的成败和效益十分关键,为此,本文基于国内外的相关研究和实践,试图阐明煤矿区自修复、自然修复和人工修复的概念及相互关系,提出我国煤矿区成本效益型生态修复的战略。

1 煤矿区生态环境的人工修复

以往,煤矿区的生态修复大都是人工修复,如在许多文献中介绍的美国最早开始进行修复的案例是在 20 世纪 20 年代印第安纳州在矿山废弃地上植树以及伊利诺斯在矿山废弃土地上恢复植被的研究和实践^[13-14]。我国最早有组织的大规模的煤矿区生态环境治理是原煤炭工业部“六五”科技攻关项目“塌陷区造地复田综合治理的研究”,(1983—1986)并在安徽淮北和兖州矿区进行实践^[5,15],该课题取得的主要成果是:① 在岱河矿用矸石充填塌陷区造地复田

11.9 hm²,并在其上建筑了试验楼(4层)、游泳池、灯光球场、游览湖。②在相城矿用电厂粉煤灰充填塌陷区,复田74 hm²、植树造林6.7 hm²、农作物种植试验10 hm²、建试验房358 m²,其余造田由农民种植。③沈庄矿对浅塌陷区挖深垫浅综合治理,将塌陷后盐碱、沥涝、荒芜的塌陷区改造成稻田、鱼塘,挖成鱼塘6.9 hm²,农田8.1 hm²,全由农民使用^[16]。经过30 a的煤矿区土地复垦与生态修复的研究与实践,我国已逐步形成了采煤沉陷地、煤矸石山和露天矿3类生态环境修复技术体系,其中采煤沉陷地的修复技术主要包括土地平整、疏排、挖深垫浅、充填等修复技术,挖深垫浅技术又可以根据修复的设备不同分为泥浆泵、拖式铲运机、挖掘机等修复技术;充填修复根据所用充填材料不同又分为煤矸石充填、粉煤灰充填、湖泥沙泥充填等修复技术;煤矸石山生态修复技术的关键是立地条件的诊断和整形整地、植物种类与种群的选择与适宜的种植技术、科学的抚育管理以及针对酸性自燃煤矸石的防灭火技术;露天矿的生态修复的关键是采用采矿—生态修复一体化、土壤重构、地貌重塑和迅速恢复植被。这些煤矿区生态修复技术都是人工修复技术,是我国30多年来取得成就的主要驱动力,已在我国许多矿区成功实践,取得了显著的经济、社会和环境效益。为此,人工修复的概念与内涵是不难理解的,即对煤炭开采造成损伤的生态环境,通过人工的整治措施,实现生态系统和功能的恢复或再生的活动。

2 煤矿区生态环境的自然修复

自然修复在生态、水土保持等领域有大量的研究^[17-19],它是指靠自然力量(营力)修复的一种过程或方法。自然营力是指自然界存在的雨、风、重力及冻融等自然界本身存在的各种生物、化学和物理等作用,如气候的变化、土壤天然种子库和种子的自然传播、土壤和植物的各种自然特性和生物化学及物理作用。国内外的研究表明:生态的自我修复能力在大自然界是一种普遍存在的现象,但是又往往被人们所忽略^[9]。自然界中土壤具有一定的净化功能,它可以将污染物通过土壤中的物理、化学和生物作用进行转化、降解或迁移。蒋高明在《让大自然修复创伤》一文中阐述了自然修复的重要性,进行了案例分析,指出了当前生态保护与修复中盲目人工修复导致生态进一步恶化的弊端^[20],强调我国西部退化生态系统的修复应当充分发挥自然力,其核心是围封,通过围封让自然界各类繁殖体自然繁衍。北美大平原采取弃耕还草的保护区计划,恢复了生态、遏制了“黑风暴”灾难。许多研究认为:退化的草地,即使因过度放牧

被严重破坏,通过禁止放牧,在10或20 a时间之内,仍可以得以恢复^[21-22]。在我国河南鲁山县西部汤镇境内红雁城沟小流域治理中,流域总面积为13.78 km²,水土流失面积为10.49 km²。该流域经2006年综合治理后,全面封禁,截至2010年,完整的水土保持体系完成,自然修复后,水土保持林地面积、林草覆盖度分别约是修复前的3.54倍和2.04倍;土壤侵蚀模数由原来的4160 t/(km²·a)减少到486 t/(km²·a)^[23]。目前水土保持治理专家倡导的一种主流方法,是提倡依靠自然力修复生态环境,既符合自然规律,又有利于人民、社会、国家。

近年来对于污染土地的修复,一种受监控的自然修复/恢复技术被欧美国家广泛地用在治理场地土壤和地下水污染上^[24]。根据监控分析,自然修复是以逐渐恢复场地的生态功能为目的,主要通过化学降解(化学转变)、生物降解(降低污染物的迁移性和生物可获取性)和物理降解(物理封隔、扩散)3种机制来以去除场地土壤和地下水的污染物,最终消除对生态环境的影响。

由以上分析可以看出,自然修复是一种在生态修复中必须坚持的原则和理念,也是一种经济有效的修复方法,它遵循自然规律、依靠自然营力,特别适宜于生态脆弱区的生态修复。

3 煤矿区生态环境的自修复

人工修复和自然修复在国内外都有很多研究,对他们的理解还是相对容易的,但对“自修复”的概念就存在很多不同的理解,如刘晋在《准噶尔盆地荒漠区梭梭灌木林的自我修复能力研究》一文中把梭梭灌木林采用封禁措施实现灌木林的自我修复更新、天然更新称之为自我修复^[25];骆永明将持久性有机污染物在土壤—植物系统降解净化功能的作用下的修复,称之为自修复^[26]。实际上,这些“自修复”、“自我修复”都是依靠自然界的自然营力——自然的气候变化、种子库以及物理、化学和生物作用实现的,因此,这些实质就是自然力量驱动的“自然修复”,是生态系统本身的自我修复或自修复。因此,以生态系统作为研究对象,系统内部因素的作用就是自然修复(自修复),外部人工力量修复生态系统就是人工修复。既然生态系统自修复、自我修复和自然修复是相同的意思,那为什么还要研究煤矿区生态环境的自修复?其原因是在神东煤矿区进行土地损伤的动态监测中,发现了与原有这些描述不同的“自修复”现象,即不依靠自然营力,而是在采煤驱动力的前提下,地表形变和裂缝等地表物理特征在开采过程中呈现先损伤后自动恢复的过程。

监测区设在神东补连塔矿,位于晋、陕、蒙 3 省接壤处,属风积沙区,其煤层赋存条件呈现出浅埋深、厚煤层以及近水平等特点,地表松散层厚度 8~35 m,工作面长 280~300 m,推进长度达 3 500 m 以上,煤层埋深 190~230 m,煤厚 4.9~7.3 m,采用一次性采全厚、综采放顶煤开采,全部垮落法管理顶板,推进速度达 12 m/d 左右,属于典型的高强度、超大工作面开采的范畴。在矿山的一个工作面上方布设地表移动观测站和地表环境损毁监测区域^[12,27],在开采前、开采中和开采后进行定位动态观测,发现地表生态环境的损毁主要表现为地表变形和地表裂缝,在开采结束后,地表形成了下沉盆地,在盆地边缘存在不均匀沉陷变形和裂缝,但在盆地中部(即工作面上方)的沉陷变形和动态裂缝呈现了“自修复”现象^[25];工作面上方地表的变形随着开采的不断推进而向前迁移,不均匀沉陷的地表逐渐恢复原有的地形;这些区域的动态地裂缝也自动闭合,这些裂缝自修复的周期约 18 d(图 1)。这种自修复现象是采矿驱动力导致的地表损伤,同时也是采矿驱动力使其自动恢复,是开采过程中产生的,符合开采沉陷学原理的^[28]。

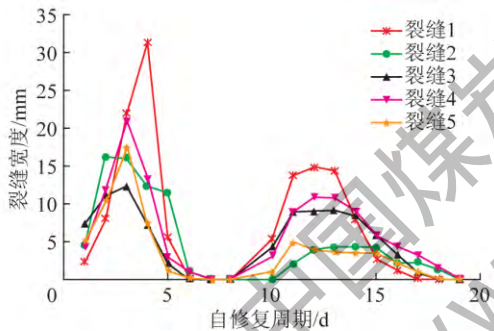


图 1 采煤沉陷动态地裂缝的自修复周期

Fig 1 Self-healing cycle of dynamic ground fissures due to coal mining

地下煤炭开采出来后,地下应力平衡发生变化,上部岩层垮落、断裂、弯曲,传递到地面就导致了地表的下沉变形,由于开采是不断向前推进的动态过程,

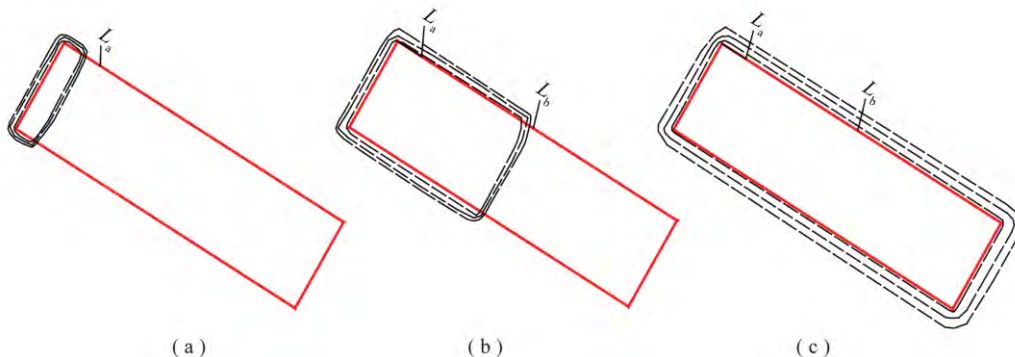


图 3 工作面上方地表裂缝发育过程示意

Fig 3 Schematic map of ground fissures development process on coal face surface

地表的变形也是一个动态的过程,以工作面开采主断面下沉曲线的变化为例阐明自修复原理(图 2):当工作面推进到 a 处时,地表形成了 $W(a)$ 下沉盆地, A 区域为最大的非均匀沉陷区,地表变形最大(形成的附加坡度较大);当工作面进一步向前推进 b, c, d 时,地表影响范围在扩大,分别形成了 $W(b), W(c), W(d)$ 沉陷盆地,原有变形最大的 A 区地表变形逐渐减小,当推进到 d 时地表 A 区域达到最大下沉值,即恢复为原有的地形(坡度),实现了自修复。由于工作面上方的地表裂缝常常出现在地表变形较大的区域,如在 $W(a)$ 下沉盆地的 A 区,因拉伸作用导致产生裂缝;而在 $W(b), W(c), W(d)$ 下沉盆地的 A 区,拉伸力减小、压缩作用加大,裂缝逐渐减少,直至闭合。

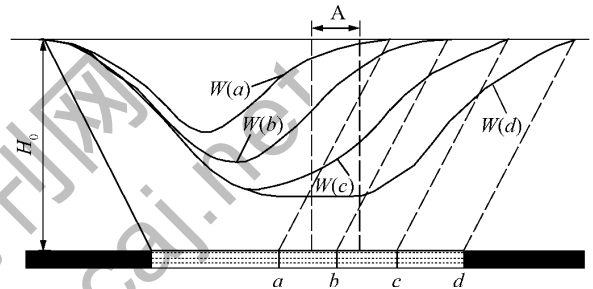


图 2 地表变形自修复原理示意

Fig 2 Schematic map of self-healing principles of ground deformation

基于野外裂缝观测的实际,可以发现裂缝位置的不断变化(图 3),工作面推进方向的正上方的前端不断出地面非均匀沉陷导致的地裂缝,但又不不断自修复,如开采推进到 a 处地表出现裂缝的位置为 L_a (图 3(a));当开采推进到 b 处时,原先 L_a 处的裂缝自动闭合,在前端 L_b 处出现新的裂缝(图 3(b)); L_b 处的裂缝又在以后的推进中自动闭合,最终的非均匀沉陷变形和裂缝就分布在工作面的开采边界(图 3(c))。工作面的边缘裂缝,往往无法自修复。

基于以上分析,不难发现,煤矿区的自修复是采矿驱动力导致地表损伤,在开采过程和结束后,又导致损伤自动修复,因此,矿区生态环境的自修复是指采矿驱动力在对地表生态环境造成损毁的过程中,又自动修复部分生态损毁的现象和过程。

4 煤矿区生态环境自修复、自然修复与人工修复的关系及生态修复战略

我国最早开始煤矿区生态环境修复的是原煤炭工业部于 1983—1986 年立项组织的采煤沉陷地综合治理,提出了泥浆泵挖深垫浅、煤矸石充填、粉煤灰充填等治理技术并在淮北矿区成功实践。对于东部矿区损毁程度明显、土地价值高的特点,往往采用人工修复,尽可能多地恢复土地和加快生态环境修复的时间,取得最大的经济效益。

随着煤炭开采的战略西移,西部煤炭开采的土地和生态环境的损伤特点与东部有显著差异,依靠自然力量修复已经被许多生态学家证实为经济有效的方法,尤其是被破坏生态环境通过自然修复往往能够与修复区域的生境特性逐渐匹配,使被干扰的生态系统由逆序演替向正常演替发展。为了实现自然修复,最常用的方法是进行封闭,禁止任何干扰进入已经损毁的区域,让自然的力量自行修复。

人工修复和自然修复都是对已经损毁的生态环境采取的积极的修复措施。人工修复与自然修复相辅相成,要因地制宜,宜自然修复则自然修复,宜人工修复则人工修复,有主有次,主次结合。同时,自然修复是一种最高境界,即使人工修复,实现生态系统的自我维持能力才是最终目的。

近年来,随着超大工作面开采技术在西部风积沙区的推广与应用,发现采煤驱动导致土地生态环境损毁的同时也存在上述的自修复现象,开采沉陷盆地表现如下特征:下沉系数偏小,一般在 0.5 左右,塌陷程度较轻;下沉盆地陡峭,移动变形值相对集中,移动变形范围进一步缩小等;地表不均匀沉陷(附加坡度)以及地裂缝二者的分布高度吻合。从而使该类型煤矿损毁区域存在典型的“分区”特征,即自修复区域和非自修复的区域(图 4),它是开采过程中的自然现象,与采矿方法和过程有关,是后续采取各种人工或自然修复措施的基础。

国内外学者的相关研究一般认为水平变形大于 2.0 mm/m 时会导致基本农田中度减产^[29],对应的附加坡度值为 $2.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ 。在我国西部煤矿区土地复垦方案编制以及采煤扰动的土地损伤评价体系中,一般认为附加坡度小于 1° 时,采煤沉陷

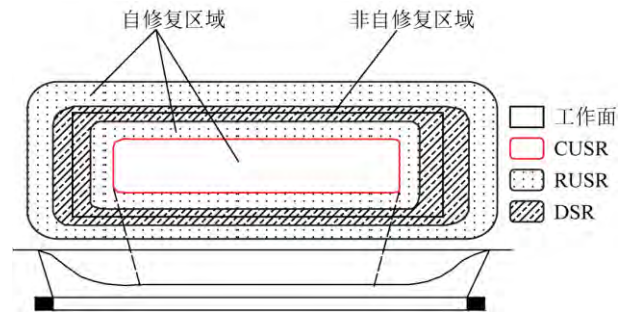


图 4 煤矿区生态环境损伤的分区特征

Fig. 4 Partition characteristic of ecological environment in coal mine

基本无影响,附加坡度为 $1^\circ \sim 3^\circ$, $3^\circ \sim 7^\circ$ 以及大于 7° 时,对应的影响程度分别为轻、中、重^[30-31]。故此,可将采煤沉陷地附加坡度小于 1° 的区域视为自修复区域(包含如下(1)和(2)),而其他地方则为非自修复区域(3)。并做如下定义:

(1)完全均匀沉陷区(complete uniform subsidence region,CUSR)。充分采动条件下,下沉盆地内部连续盆底的区域定义为完全均匀沉陷区,无附加坡度;

(2)相对均匀沉陷区(relative uniform subsidence region,RUSR)。下沉盆地盆底的边缘以及塌陷边界附近相对平缓的区域定义为相对均匀沉陷区,附加坡度为 $0^\circ \sim 1^\circ$;

(3)非均匀沉陷区(differential subsidence region,DSR)。下沉盆地除(1)和(2)之外的区域。

综合以上分析,西部煤矿区生态环境修复的策略是:首先进行采煤损毁的诊断,明确界定自修复的区域以及进行非自修复区域损毁程度科学评价,对自修复的区域实行自然修复,对非自修复区域采取人工修复为主、自然修复为辅的修复措施,避免盲目地对整个受损区域进行人工修复,最大限度地减少修复成本,获取最大的效益,即实现成本效益型修复。以神东补连塔煤矿某工作面为例,该工作面长 300.50 m,走向长 3 592 m,以下沉 10 mm 为边界线,开采沉陷预计表明,高强度开采形成的下沉盆地的总面积约为 $189.66 \times 10^4 \text{ m}^2$,其完全均匀沉陷、相对均匀沉陷以及非均匀沉陷区的面积分别为 34.50×10^4 , 94.75×10^4 以及 $60.41 \times 10^4 \text{ m}^2$,自修复区域面积占整个损毁面积的 68.15%,说明,修复投资的重点为非自修复区,可减少大量修复资金。

对于同一开采单元,采矿计划、工作面设计以及接续工作虽然不会改变所有采矿活动结束后地表沉陷与变形的最终布局,但对沉陷盆地的形成时间以及动态过程确有重要的影响^[32]。相比于传统小工作面

开采工艺,超大工作面易使地表达达到充分采动,减少了重复扰动的次数,采空区上方地表仅承受动态变形,使地表一次性出现大面积的均匀沉陷自修复区域,缩短了采煤扰动的时长,因此,加大工作面尺寸是增强煤矿区自修复能力的有效措施。

5 结 论

(1)煤矿区的生态环境损伤存在自修复现象,它是指采矿驱动力在对地表生态环境造成损毁的过程中,又自动修复部分生态损毁的现象和过程,是开采过程中覆岩层移动变形的自然结果,扩大开采工作面的尺寸可以增加自修复的面积,加快推进速度可以加快自修复进程,对节约修复成本具有重要作用。

(2)自然修复是自然界普遍存在的现象,它是指靠自然力量(营力)修复的一种过程或方法。自然营力如气候的变化、土壤天然种子库和种子的自然传播、土壤和植物的各种自然特性和生物化学及物理作用,是生态系统本身的自我修复或自修复,我们统称为自然修复。

(3)自然修复往往需要适宜的自然条件,修复时间相对长,而人工修复可以按照人们的意愿快速修复,但一般修复成本高。人工修复与自然修复应相辅相成、因地制宜,宜自然修复则自然修复,宜人工修复则人工修复,有主有次,主次结合。同时,自然修复是一种最高境界,即使人工修复,实现生态系统的自我维持能力才是最终目的。

(4)西部煤矿区生态环境修复的策略是:首先进行自修复区域与非自修复区域的划分和损毁程度的科学评价,采取分区修复的战略:对自修复的区域实行自然修复,对非自修复区域采取人工修复为主、自然修复为辅的修复措施,最大限度地减少修复成本,获取最大的效益,即实现成本效益型修复。

参考文献:

- [1] 胡振琪,赵艳玲,王凤娇.我国煤矿区土地复垦的现状与展望[A].第七次煤炭科学技术大会文集(下册)[C].北京,2011:1075-1079.
Hu Zhenqi,Zhao Yanling,Wang Fengjiao. The present situation and prospect of land reclamation mine area in China[A]. The Conference of the 7th Coal Science and Technology Meeting(the second volume)[C]. China National Coal Association,2011:1075-1079.
- [2] 胡振琪.土地复垦与生态重建[M].徐州:中国矿业大学出版社,2008.
- [3] Barnhisel R I,Darmody R G,Daniels W L,et al. Reclamation of drastically disturbed lands[M]. USA: American Society of Agronomy,Crop Science Society of America,Soil Science Society of America,2000.
- [4] 胡振琪,杨秀红,鲍 艳,等.论矿区生态环境修复[J].科技导报,2005,23(1):38-41.
Hu Zhenqi,Yang Xiuhong,Bao Yan,et al. On the restoration of mine eco-environment[J]. Science & Technology Review,2005,23(1):38-41.
- [5] 胡振琪.中国土地复垦与生态重建20年:回顾与展望[J].科技导报,2009,27(17):25-29.
Hu Zhenqi. Review and prospect of land reclamation and ecological restoration in China[J]. Science & Technology Review,2009,27(17):25-29.
- [6] 卞正富.国内外煤矿区土地复垦研究综述[J].中国土地科学,2000,14(1):6-11.
Bian Zhengfu. Review of land reclamation mine area in China and abroad[J]. China Land Science,2000,14(1):6-11.
- [7] 胡振琪,赵艳玲,程玲玲.中国土地复垦目标和内涵扩展[J].中国土地科学,2004,18(3):3-8.
Hu Zhenqi,Zhao Yanling,Cheng Lingling. Extension of goal and meaning of land reclamation in China[J]. China Land Science,2004,18(3):3-8.
- [8] 张建民,李全生,胡振琪,等.西部风积沙区超大综采工作面开采生态修复模式研究[J].煤炭科学技术,2013,41(9):173-177.
Zhang Jianmin,Li Quansheng,Hu Zhenqi,et al. Study on ecological restoration mode of ultra wide fully-mechanized coal mining in west China aeolian sand area[J]. Coal Science and Technology,2013,41(9):173-177.
- [9] 张 宏,韩敏玉.论生态的自我修复能力与环境保护[J].中国环境管理,2001(5):6-8.
- [10] Petty Todd J,Brady Gutta,Richard Herd,et al. Identifying cost-effective restoration strategies in mining impacted West Virginia watersheds[A]. 25th Annual Meetings of the American Society of Mining and Reclamation and 10th Meeting of IALR[C]. 2008:849-867.
- [11] 李全生,贺安民,曹志国.神东矿区现代煤炭开采技术下地表生态自修复研究[J].煤炭工程,2011(12):120-122.
Li Quansheng,He Anmin,Cao Zhiguo. Self-healing of surface ecology under modern coal mining technology in Shendong coal area[J]. Coal Engineering,2011(12):120-122.
- [12] 胡振琪,王新静,贺安民.风积沙区采煤沉陷地裂缝分布特征与发生发育规律[J].煤炭学报,2014,39(1):11-18.
Hu Zhenqi,Wang Xinjing,He Anmin. Distribution characteristic and development rules of ground fissures due to coal mining in windy and sandy region[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(1):11-18.
- [13] Croxton W C. Revegetation of Illinois coal stripped lands[J]. Ecology,1928(9):155-175.
- [14] Plass W T J L. Powell-Reclamation of surface mined lands[M]. 1988.
- [15] 周锦华,胡振琪,高荣久.矿山土地复垦与生态重建技术研究现状与展望[J].金属矿山,2007(10):11-13.
Zhou Jinhua,Hu Zhenqi,Gao Rongjiu. Status quo and prospect of research technology for mine land reclamation and ecological reconstruction[J]. Metal Mine,2007(10):11-13.
- [16] 孙绍先,李祝华,周树理.塌陷区造地复田综合治理的有效途径

- [J]. 煤炭科学技术, 1987, 15(6): 20-22.
Sun Shaoxian, Li Zhuhua, Zhou Shuli. The comprehensive control methods of land reclamation mine subsidence area[J]. Coal Science and Technology, 1987, 15(6): 20-22.
- [17] 徐志强, 张光灿, 刘 霞, 等. 淮河流域伏牛山区水土保持生态自然修复适宜性评价与分区[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(3): 17-23.
Xu Zhiqiang, Zhang Guangcan, Liu Xia, et al. Suitability evaluation and zoning in ecological natural restoration of soil and water conservation in Funiu Mountains Area of Huaihe River Valley[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(3): 17-23.
- [18] 刘国彬, 杨勤科, 陈云明, 等. 水土保持生态修复的若干科学问题[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 126-130.
Liu Guobin, Yang Qinke, Chen Yunming, et al. Some scientific issues of ecological restoration of soil and water conservation [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(6): 126-130.
- [19] 第宝锋, 崔 鹏, 艾南山, 等. 中国水土保持生态修复分区治理措施[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(2): 64-69.
Di Baofeng, Cui Peng, Ai Nanshan, et al. The study of building measures on ecological restoration in China[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2009, 41(2): 64-69.
- [20] 蒋高明. 让大自然修复创伤[J]. 大科技(科学之谜), 2003(3): 18-21.
Jiang Gaoming. Repair damage by nature[J]. Super Science, 2003(3): 18-21.
- [21] Akiyama, T. & K. Kawamura. Grassland degradation in China: Methods of monitoring, management and restoration[J]. Grassland Science, 2007, 53(1): 1-17.
- [22] Jeddi K, Chaieb M. Changes in soil properties and vegetation following livestock grazing exclusion in degraded arid environments of South Tunisia[J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2010, 205(3): 184-189.
- [23] 于建伟, 李国召. 重视生态自然修复, 加快水土保持生态环境建设步伐[J]. 科技信息, 2011(27): 413-417.
Yu Jianwei, Li Guozhao. Attach importance to natural restoration, to speed up the pace of construction of soil and water conservation[J]. Science & Technology Information, 2011(27): 413-417.
- [24] 李小平, 程 曦. 场地污染土壤和地下水修复中受监控的自然修复/恢复技术的应用与进展[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(8): 73-78.
Li Xiaoping, Cheng Xi. The application of monitored natural attenuation to soil and groundwater remediation contaminated site[J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(8): 73-78.
- [25] 刘 晋. 准噶尔盆地荒漠区梭梭灌木林的自我修复能力研究[J]. 中国水土保持, 2006(3): 25-26.
Liu Jin. The research on natural restoration of Junjun shrubbery of desert in Junggar Basin[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(3): 25-26.
- [26] 骆永明, 涂 晨. 农田土壤-植物系统持久性有机污染物的界面过程与自修复——以多氯联苯为例[J]. 土壤与作物, 2012, 1(2): 65-69.
Luo Yongming, Tu Chen. Advances in the interfacial processes and self-remediation of persistent organic pollutants in soil-plant systems; An example of polychlorinated biphenyls[J]. Soil and Crop, 2012, 1(2): 65-69.
- [27] 王新静, 胡振琪, 杨耀淇, 等. 采动动态地裂缝发育特征监测装置的设计与应用[J]. 煤炭工程, 2014, 46(3): 131-133.
Wang Xinjing, Hu Zhenqi, Yang Yaoqi, et al. Application and design of monitoring and measuring device of mining dynamic cracking development of surface ground[J]. Coal Engineering, 2014, 46(3): 131-133.
- [28] 何国清. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
- [29] Peter Darling. SME mining engineering handbook(3rd edit)[M]. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., 2011.
- [30] 赵艳玲, 黄琴焕, 薛 静, 等. 矿区土地复垦方案编制中土地破坏程度评价研究[J]. 金属矿山, 2009(5): 161-163, 167.
Zhao Yanling, Huang Qinhuang, Xue Jing, et al. Study on the assessment of land destroy degree in mine and reclamation design [J]. Metal Mine, 2009(5): 161-163, 167.
- [31] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [32] 杨 伦, 于广明, 杜连壁, 等. 减小高潜水位矿区开采沉陷积水淹田的有效途径[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 449-452.
Yang Lun, Yu Guangming, Du Lianbi, et al. A effective way to prevent damage of farmland due to mining[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(5): 449-452.